

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ №16-38-00083 мол_а.

Список публикаций:

- [1] Комарский А. А. Вольфрамографитовый анод для импульсной взрывозмиссионной рентгеновской трубки / А. А. Комарский, С. Р. Корженевский, А. С. Чепусов // Тезисы докладов СПФКС-17. – 2016. – С. 174
[2] Кузнецов В. Л. Импульсная металло-керамическая рентгеновская трубка / В. Л. Кузнецов, С. Р. Корженевский, А. А. Комарский, А. С. Чепусов // Патент на полезную модель № 130135. 29.12.2012.
[3] Блинов, Н. Н. Рентгенодиагностические аппараты / Н. Н. Блинов, Л. В. Владимиров, Г. П. Кочетова, Н. А. Туманов, А. З. Шварцман, А. М. Якобсон, В. Л. Ярославский. – М., «Медицина». – 1976. – 240 с.

Теория наносекундного электрического пробоя газа высокого давления в условиях пространственно-неоднородной начальной ионизации

Баранова Екатерина Михайловна

Козырев Андрей Владимирович, Семенюк Наталья Степановна

Научно исследовательский Томский государственный университет

Козырев Андрей Владимирович, д.ф.-м.н.

katerina.baranova94@gmail.com

Представлено теоретическое исследование развития газового разряда высокого давления (газ SF₆ при давлении 10⁵ Па) в коаксиальном диоде, внутренний электрод которого является катодом и имеет радиус $r_c = 1$ мм, а внешний – анодом с радиусом $r_a = 10$ мм. На диод подавался импульс напряжения $U_s(t)$ амплитудой 200 кВ и длительностью переднего фронта 0.25 нс по уровням 0.1–0.9 от амплитуды.

Как известно, при таких уровнях напряжения в газовых разрядах наблюдаются убегающие электроны [1]. Для того чтобы выделить в разряде ток быстрых электронов в расчете используется «энергетический» фильтр в виде алюминиевой фольги толщиной $d = 10$ мкм, отсекающий медленные электроны, приходящие на анод из плазмы разряда.

Цель работы состояла в выяснении влияния на разрядные характеристики условий предварительной ионизации. А именно, задавались различные пространственные распределения концентрации начальных электронов: от объемно-однородного до резкого радиально-неоднородного распределения. В частности, для вариации пространственной неоднородности был использован следующий вид распределения начальной концентрации:

$$n(r) = n_0 \beta \left(1 - r_c^2 / r_a^2\right) \frac{\exp\{\beta(1 - r^2 / r_a^2)\}}{\exp\{\beta(1 - r_c^2 / r_a^2)\} - 1}. \quad (1)$$

Функциональный вид формулы (1) обусловлен тем, что она всегда дает одинаковое количество начальных электронов в коаксиальном промежутке, а параметр β задает лишь степень неоднородности: при $\beta=0$ распределение однородное с концентрацией n_0 , с ростом β начальная концентрация все сильнее прижимается к катоду, при $\beta < 0$ распределение прижимается к аноду. Распределения концентрации электронов при $n_0 = 1$ и разных β представлены на рисунке 1.

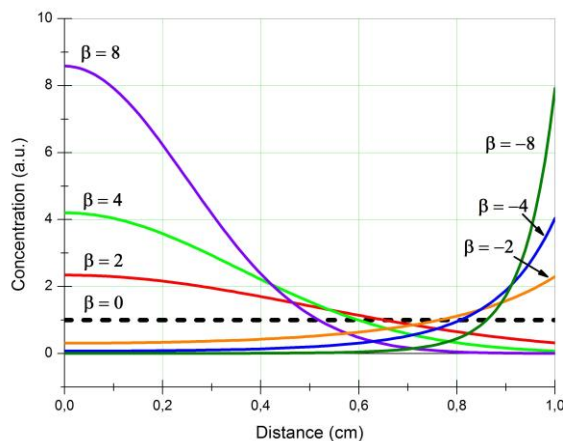


рис.1. Начальные распределения концентрации электронов при $n_0 = 1$ и при разных значениях β .

Для теоретического описания пробоя использовалась так называемая гибридная модель разряда: плазменные частицы описывались в рамках дрейфово-диффузного приближения, а убегающие электроны с помощью кинетического уравнения Больцмана подробности модели и методы решения уравнений изложены в работах [2, 3].

Так как в исследуемых режимах все значимые процессы протекают в субнаносекундном диапазоне времени, в рамках минимальной теоретической модели мы полностью пренебрегаем движением ионов. Для описания пространственно-временной эволюции плотности плазменных электронов и напряженности электрического поля в промежутке используются три уравнения: уравнение непрерывности для электронной компоненты плазмы, уравнение сохранения для плотности полного радиального тока (включая ток смещения) и уравнение Кирхгофа для электрической цепи.

Результаты расчетов динамики напряжения на промежутке при различных β представлены на рисунке 2а, а форма импульсов тока убегающих электронов на рисунке 2б. Уровень начальной концентрации электронов в промежутке $n_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$, балластное сопротивление в цепи питания разряда 75 Ом.

Как видно из рис. 2а, импульс напряжения на промежутке имеет немонотонный вид, с увеличением коэффициента β , то есть с ростом степени неоднородности начальной концентрации. С увеличением параметра β стадия пробоя затягивается во времени, и амплитудное напряжение на промежутке растет. Как известно из экспериментов и в согласии с теоретическими оценками [1], увеличение напряженности электрического поля должно приводить к значительному увеличению количества убегающих электронов. Именно этот эффект и демонстрируют наши расчеты. Так, на рис. 2б представлены импульсы тока убегающих электронов, соответствующие кривым напряжения, приведенным на рис. 2а. Видно, что амплитуды импульсов тока быстрых электронов значительно увеличиваются с ростом амплитудного напряжения на промежутке (стоит отметить, что на рис. 2б графики тока быстрых электронов имеют логарифмическую шкалу).

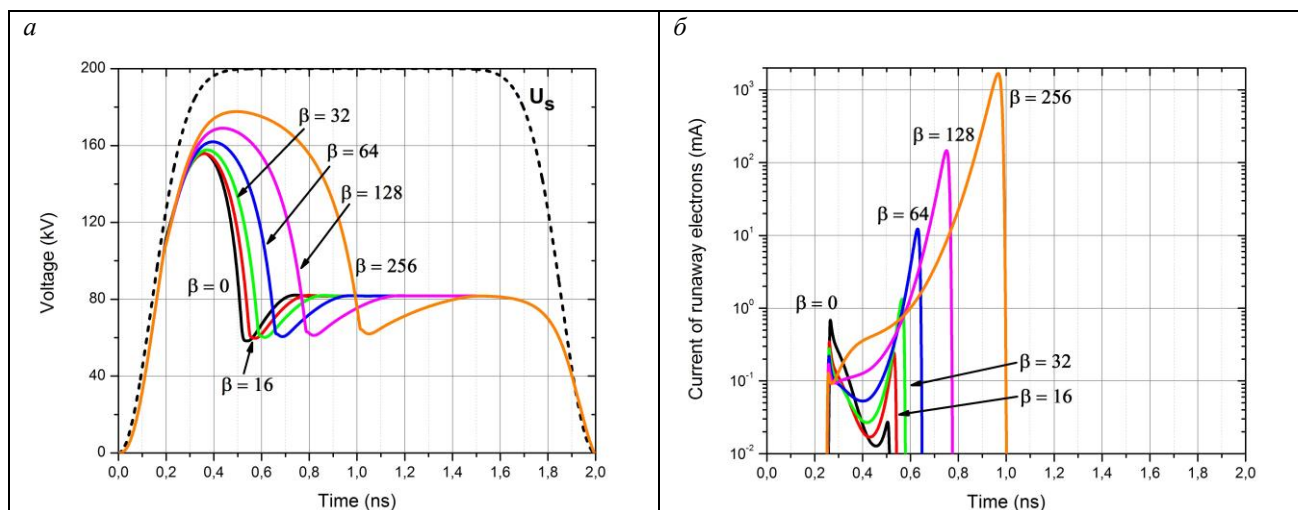


рис.2. Зависимости от времени: а) напряжения на источнике и напряжений на промежутке (пунктиром обозначено напряжение источника); б) импульсы тока быстрых электронов за фольгой.

Кроме того, из рисунка 2 видно, что в случае однородной предионизации амплитудное значение импульса тока убегающих электронов приходится на передний фронт импульса напряжения, а при резко неоднородной (прикатодной) предионизации амплитудный ток генерируется на спадающем участке импульса напряжения на диоде. Это также свидетельствует о различной локализации места рождения основной группы убегающих электронов в диоде.

Таким образом, в рамках данной модели выявлено, что сильное пространственно-неоднородное распределение концентрации электронов значительно влияет как на время коммутации диода, так и на количество убегающих электронов в разряде.

Список публикаций:

- [1] В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Семенюк // Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления. Томск: STT, 2015. С 318-333.
- [2] В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, Н.С. Семенюк // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. №. 12. С. 3-10.
- [3] A. Kozыrev, V. Kozhevnikov, M. Lomaev, D. Sorokin, N. Semeniuk and V. Tarasenko // Europhysics Letters, 114, 45001 (2016)